

复杂地形条件下的工程波要素确定

冯卫兵 施凌
河海大学海洋学院

摘要: 随着我国国民经济的迅猛发展,沿海的港口开发也随之升温,且港口码头的水深要求也随之增大,同时相对条件较好的区域资源已日趋枯竭。开发象辐射沙洲潮汐通道建设港口势在必行。因此,如何进行这种观测资料匮乏、水下地形复杂条件下的拟建工程设计波要素的计算和研究受到学术和工程界的关注。本文根据如东人工岛工程的设计波浪要素计算实例,就深水波要素、计算模式以及有关参数的确定方法提出一些看法,希对相关工程有一定的借鉴作用。

Abstract: With the rapid development of economy, coastal port exploitation builds faster, and a high request to the water depth is asked, at the same time comparative better area resource decreases day after day. So it is necessary to exploit the tidal inlet of the radial shoal to construct ports. Therefore how to calculate and study the design wave elements of the proposed project, which observed data is short of and the underwater topography, is complicated is given great attention by both academia and engineering. This paper gives some suggestions to how to decide wave characteristics in deep water, calculation model and relational parameters based on the example of calculation the design wave elements of Rudong Artificial Island project, from which the author hopes to provide some help to correlative projects.

1. 研究目的

波浪是主要海洋动力因素,也海洋工程建筑物的主要荷载,对于海上开敞式码头更是直接受到波浪的袭击,研究工程所在海域的波浪特性与尺度是进行工程前期工作中一个不可缺少的部分。对于苏北辐射沙洲这种深槽和浅滩相间,水下地形十分复杂,波浪作用又较强的区域(见图1),如何合理确定拟建工程的设计波浪参数是本文研究的主要目的。

2. 基础资料及拟采用的技术路线

众所周知,江苏沿海300多公里的海岸线上,近海海域仅有连云港和吕泗两个海洋观测站,而整个辐射沙脊群区域波浪资料几乎是个空白。因此,欲确定该海域拟建工程的设计波浪参数,只能采用适合工程海区的深水风浪后报模式,依据气象站多年风速、风向实测资料进行频推求各方向不同重现期的外海深水波要素,其次建立复杂地形条件下考虑底摩阻及局部风影响的浅水波浪变形数学模型,计算各种工况下拟建工程地点(如人工岛、栈桥、码头)未建前及已建工程后的不同重现期的波浪要素,为设计单位提供设计依据。

3. 外海波要素确定

由前面叙述可知,欲正确确定外海深水区的波浪要素,主要方法有两种:其一是利用距离工程点最近的岸台气象站风速观测资料,并进行海—陆风速订正,确定海上设计风速,直接推求出某一深水区的波浪要素;其二是采用历史天气图结合定点实测风速风向资料确定风场后,分别进行各风场对应的波浪场,取得某一深水区的波要素序列进行频率分析推求各种

重现期的深水区设计波要素；经综合比较最终确定安全可靠的深水设计波要素。

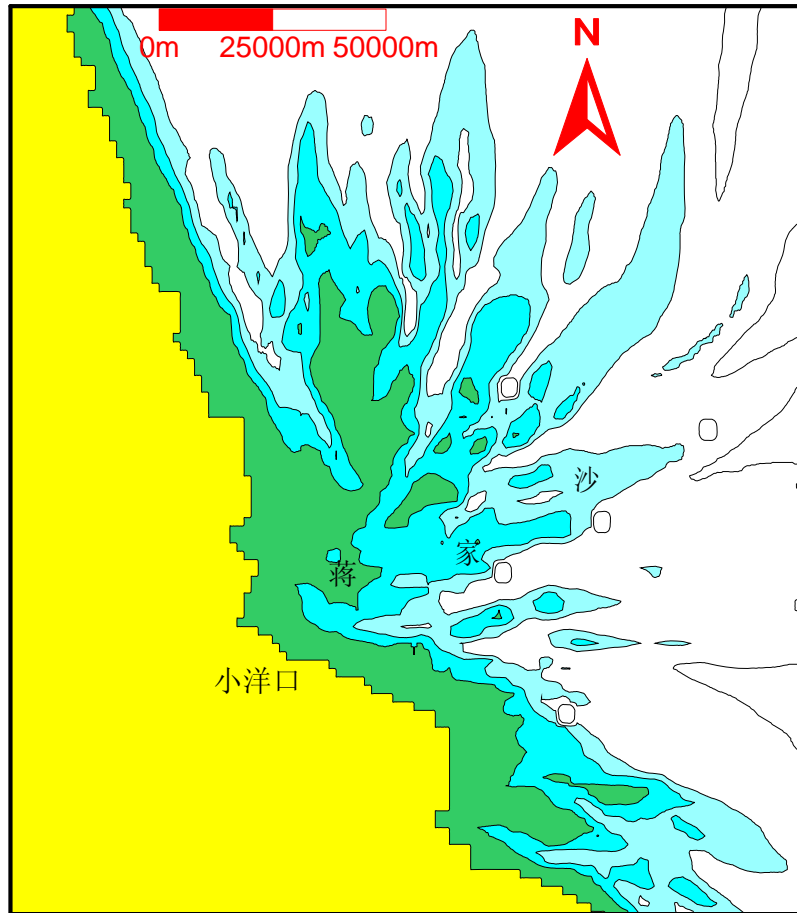


图1 苏北辐射沙脊示意图

3.1 应用岸站实测风速资料计算外海波浪要素

该方法主要包括以下基本步骤：

(1) 岸台气象站实测资料统计分析。主要通过各风向出现频率及其平均风速、最大风速的统计，获得工程海域的常风向、强风向以及各风向的风速大小，对工程海域的风场特性有一个比较全面的了解。

(2) 确定不同重现期设计风速。按年最大风速采样法，对岸台气象站 10 分钟平均的最大风速进行频率分析，得到各个方向的不同重现期风速值，再由此确定海上设计风速。

(3) 海上设计风速的合理性分析。为了验证推算的不同重现期风速的可靠性，要引用了相关海洋水文站、相关已建工程的设计风速资料与之比较，分析各方向不同重现期设计风速的合理性、可靠性。

(4) 深水区域风浪要素计算。这部分工作最为重要，就目前国内外常用的定常风浪计算公式有好多组（种），必须经过验证计算一些风、浪同步资料，有针对性的选择工程海域风浪特性的计算公式。计算结果表明，在深水区域我国的海港水文规范公式（青岛海洋大学公式）较为合适，相对误差较小。

事实上，对于 $\frac{gF}{V^2} \gg 1$ 的深水域，各种计算公式基本可概括为：

$$\frac{gH_s}{V^2} = a_H \left(\frac{gF}{V^2} \right)^{b_H} \quad (1)$$

$$\frac{gT_s}{V} = a_T \left(\frac{gH_s}{V^2} \right)^{b_T} \quad (2)$$

$$\frac{gt_{\min}}{V} = a_t \left(\frac{gT_s}{V} \right)^{b_t} \quad (3)$$

式中系数见表 1。

表 1 深水域风浪要素计算公式有关系数

计算方法	a_H	b_H	a_T	b_T	a_t	b_t
海港水文规范	0.0055	0.35	17.65	2/3	216	3.30
国家堤防工程规范	0.00288	0.45	12.64	0.50	104	3.45
SMB 公式 (美国)	0.00354	0.42	16.70	0.595	139	3.00
前苏联规范	0.003136	1/2	16.70	0.625	24.86	3.20

由此计算得到辐射沙脊群外缘 20~30m 等深线附近的向岸风向的深水波要素如表 2。

表 2 辐射沙脊群外缘向岸风向的深水波要素表 (岸台气象站资料方法)

方向	波要素	风浪重现期 (年)				
		50	25	10	5	2
N~NNE	\bar{H} (m)	3.40	3.26	3.01	2.80	2.44
	H_s (m)	5.14	5.05	4.68	4.36	3.82
	\bar{T} (秒)	8.09	8.01	7.69	7.43	6.93
NE~ENE	\bar{H} (m)	4.83	4.60	4.18	3.84	3.24
	H_s (m)	7.50	7.16	6.54	6.01	5.10
	\bar{T} (秒)	9.75	9.51	9.08	8.70	7.99
E~ESE	\bar{H} (m)	4.95	4.67	4.13	3.71	3.02
	H_s (m)	7.69	7.26	6.46	5.82	4.76
	\bar{T} (秒)	9.87	9.59	9.02	8.55	7.71
SE~SSE	\bar{H} (m)	4.16	3.97	3.63	3.34	3.00
	H_s (m)	6.51	6.21	5.70	5.26	4.73
	\bar{T} (秒)	9.05	8.84	8.45	8.11	7.68

3.2 应用地面天气图资料计算外海波要素

该方法主要包括以下基本步骤：

(1) 地面天气图的选择。按要求必须选择 20 年以上的天气资料，但气象部门的地面天气图

为每日四次即 02、03、14、20 时，全年共计 1460 幅，而采用不同的地面天气图计算的风场是不同的，显然对地面天气图必须加以筛选。本文经过计算探讨觉得采用当年年极值风速现时刻的临近时段的地面天气图作为波浪预报模式的基本样本资料比较合理、可靠。

(2) 风场计算。海面的风场是海浪数值计算的重要组成部分，选择科学合理的风场计算模式十分重要。本文计算中以梯度风模式为主并采用《海港水文规范》等对气压类型、大气稳定度、近海面垫层摩阻等的相关修正规定，先计算出梯度风，再换算海面上 10 米高程处的风速风向值。

(3) 波浪场计算模型及其适用性检验。应用风场计算浪场的模式较多，经过 SWAN、WAM 以及新型混合型海浪数值模式进行风浪计算并用实测波浪资料进行适用性检验，最终确定应用如下深水风浪模式为：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + 8.576V^{-1/3}H^{2/3}\left(\cos\alpha\frac{\partial H}{\partial x} + \sin\alpha\frac{\partial H}{\partial y}\right) = 0.42 \times 2.526 \times 10^{-8}V^{3.4}H^{-1.2} \quad (4)$$

式中 α 为波向（风向），0.42 为校正系数。 V 为海面上方 10 米处的风速。

利用地面天气图海面风场计算得到的历年最大（ H_s ），1974~1995 年共 22 年间，以 83 年为最大，其有效波高可达 6.78m。与利用岸台气象站资料推求方法相类似，将以上述利用地面天气图计算风场直接计算得到的各年份的深水边界处的波高进行频率分析，求得各种重现期的波高值列于表 3 中。由此可见，50 年一遇波浪的有效波高为 7.05m。

表 3 辐射沙脊群外缘深水区域设计波要素（天气图方法）

波要素	风浪重现期（年）				
	50	25	10	5	2
\bar{H} （m）	4.41	4.20	3.97	3.74	3.37
H_s （m）	7.05	6.72	6.35	5.98	5.39
\bar{T} （秒）	9.31	9.10	8.84	8.58	8.14

3.3 外海波要素的综合分析与确定

经过以上两种方法（岸站实测风速统计法和地面天气图法）分别得到了不同重现期的深水区域的设计波浪要素，比较表 2 和表 3 可以发现，表 3 中各个重现期的波高值介于表 2 中的 NE 向和 N 向的波高值之间，从量值上差别不是很大。另外还可看出，重现期长的地面天气图推求法的结果小于岸站实测风速推求法的结果，而重现期短的则相反，这主要是地面天气图推求法为不分方向的计算所致，二者统计代表性不同。再者，相对而言地面天气图的精度要比岸站实测风速的精度差一些。综合分析认为，按岸站实测风速风向推求获得的多年一遇设计波浪要素作为波浪折射绕射变形计算的起始边界波要素更为合理可靠。

4. 工程设计波要素的确定

4.1 波浪折射绕射变形计算模式的选择

目前进行波浪浅水传播变形计算的方法归纳起来大致有两类：其一为不规则波方法，代

表性的模式有青岛海洋大学等提出的新型混合型海浪数值模式、荷兰 Delft 大学 3-D 中的 WAM 型海浪数值预报模式；其二为代表波（如有效波或者平均波等规则波）方法，常用的有缓变水流水深中波浪绕射折射数学模型、特征线（波向线）理论—数值模式。每种模式都有自身的优缺点和适用范围，现分析如下：

(1) WAM 型海浪数值预报模式

国外近来常用的 WAM 型第 3 代海浪谱分量平衡方程中关于源函数的确定有不同的表达形式：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(\bar{C}_g + \bar{u})N] + \frac{\partial}{\partial \sigma} [C_\sigma N] + \frac{\partial}{\partial \theta} [C_\theta N] = \frac{S}{\sigma} \quad (5)$$

$$N = N(\sigma, \theta, \bar{x}, t) = \frac{F(\sigma, \theta, \bar{x}, t)}{\sigma} \quad (6)$$

$$S = S(\sigma, \theta, \bar{x}, t) = S_{in,e} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} + S_{dbre} \quad (7)$$

风输入源函数

$$S_{in,e} = \max \left\{ 0, \left[0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{28u_*}{\sigma/k} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \right\} \sigma F(\sigma, \theta) \quad (8)$$

$$u_* = u_{10,r} \left[(0.8 + 0.065u_{10,r}) 10^{-3} \right]^{1/2} \quad (9)$$

破碎耗散源函数

$$S_{dis}(j) = -2.36 * 10^{-5} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{k}} \left[\frac{\alpha}{\alpha_{pm}} \right]^2 F(\sigma, \theta) \quad (10)$$

底摩擦耗散源函数

$$S_{bot} = -\frac{8}{3\pi} f_w \langle u^2 \rangle^{1/2} \quad (11)$$

深度限制破碎耗散采用总能量限制

$$\bar{E}_{max} = \frac{0.035 \bar{C}^4}{g^2} \quad (12)$$

应该指出，此模式与 Delft 大学 3D 模式中的 SWAN 模式基本相同，在应用于浅水域时只反映波浪折射，未能反映波浪绕射现象，不一定适用于水底地形复杂变化情况。

(2) 缓变水流水深中波浪绕射折射数学模型

考虑底摩擦能耗、风能摄入的缓变水流、水深中波浪绕射、折射数学模型表达式为：

$$\left(\frac{D}{Dt} + W^* \right) \frac{D\Phi}{Dt} + (\nabla \cdot \bar{U}) \left(\frac{D}{Dt} + W^* \right) \Phi - \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + (\bar{\sigma}^2 - k^2 CC_g) \Phi = 0 \quad (13)$$

式中：

$$\text{波动速度势 } \varphi(x, y, z, t) = \Phi(x, y, t) \cosh k(d+z) / \cosh kd$$

$$\text{复振幅函数 } \Phi(x, y, t) = (-ig)R(x, y, t) \exp\{i\psi(x, y, t)\}$$

波浪绝对频率 ω 与相对频率 σ

$$\omega = -\frac{\partial \psi}{\partial t} = \sigma + \bar{K} \cdot \bar{U}, \quad \sigma = \frac{D}{Dt} \psi = \omega - \bar{K} \cdot \bar{U}$$

$$\text{波高 } H = 2R\sigma, \quad \text{波浪波数矢 } \bar{K} = \nabla \psi = (K \cos \alpha, K \sin \alpha)$$

$$\tilde{\sigma}^2 = gk \tanh kd = \omega^2 + \frac{1}{4}W^{*2}, \quad C = \tilde{\sigma}/k, \quad C_g = \frac{\partial \tilde{\sigma}}{\partial k} = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

$\vec{U}(x, y, t)$ —缓变水流水平流速矢, $\vec{U} = (U \cos \alpha_u, U \sin \alpha_u)$,

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla, \quad \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

W^* —综合能量系数 (单位为 1/秒), $W^* = W_d^* - W_{in}^*$

水底摩阻能耗系数:

$$W_d^* = \frac{8fH}{3\pi g} \left(\frac{K\sigma}{k \sinh kd} \right)^3$$

W_{in}^* —各种能量输入与耗损 (底摩阻耗损除外) 的净值:

$$W_{in}^* = 2b_H \frac{gC_g}{V_*^2} \left(\frac{a_H V_*^2}{gH} \right)^{1/b_H}, \quad V_*^2 = V \cos(\alpha_V - \alpha), \quad a_H = 0.0055, \quad b_H = 0.35$$

风速矢 $\vec{V} = (V \cos \alpha_V, V \sin \alpha_V)$

(3) 缓变水流水深中波浪绕射折射数学模型的等价控制方程组

波周期守恒方程

$$\frac{\partial \vec{K}}{\partial t} + \nabla \omega = 0 \quad (14)$$

波数矢无旋性方程

$$\nabla \times \vec{K} = 0 \quad (15)$$

光程函数方程

$$K^2 = k^2 + \frac{\nabla \cdot (CC_g \nabla R)}{CC_g R} - \frac{1}{CC_g R} \left\{ \frac{D}{Dt} \left(\frac{D}{Dt} + W^* \right) R + (\nabla \cdot \vec{U}) \left(\frac{D}{Dt} + W^* \right) R + \frac{R}{4} W^{*2} \right\} \quad (16)$$

波作用守恒方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(\vec{U} + \frac{CC_g \vec{K}}{\sigma} \right) A \right] = -W^* A, \quad A = \sigma R^2 / 2 = H^2 / 8 \quad (17)$$

对于无水流 ($\vec{U} = 0$)、无绕射 ($\vec{K} = \vec{k}$) 的深水风浪:

$$\frac{\partial H^2}{\partial t} + \nabla \cdot (C_g H^2) = W_{in}^* H^2$$

从而可化为深水风浪数值模式。

(4) 无水流定常波传播数值模型

波周期守恒方程

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = const \quad (18)$$

波数矢无旋性方程

$$\nabla \times \vec{K} = 0 \quad (19)$$

光程函数方程

$$K^2 = k^2 + \frac{\nabla \cdot (CC_g \nabla R)}{CC_g R} + \frac{\omega^2 - \tilde{\sigma}^2}{CC_g} \quad (20)$$

波作用守恒方程

$$\frac{\partial H^2}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{CC_g K^p}{\sigma} H^2 \right) = -W^* H^2 \quad (21)$$

此控制方程组可用于外海风浪在浅水域大范围传播变形（考虑波浪折射、绕射、风能摄入及波能耗损等因素），计算简便、快捷。

4.2 计算模式的适用性检验

为了检验波浪折射绕射传播变形联合数学模型的适用性并且确定相关的计算参数，利用观测站的实测风、浪资料中选择了三组有天气图对应的观测数据，分别采用风浪场直接计算模式和本文采用波浪折射绕射浅水变形联合计算模式进行了计算，在计算过程中对底摩阻系数（分别取 0.01、0.075 和 0.005）以及沿程增加风能输入与不增加风能输入等多种不同情况进行了验算。结果表明，对于苏北辐射沙洲的中心区域，外海波浪在传播过程中发生了折射、绕射以及浅水变形等，波高波向都有很大变化，风浪场直接计算模式虽然考虑了风浪与涌浪的转换、沿程的风能输入与耗损、破波的能量损失等多种因素，但该模式的水下地形的变化反应较弱，也没有考虑波浪的绕射影响，计算结果与实测结果差别相对较大，相比较而言，应用波浪折射绕射浅水变形联合计算模式计算的结果与实测值较为吻合。验证计算还发现，对于应用波浪折射绕射浅水变形联合计算模式进行计算时，采用底摩阻系数取 0.01 同时还应考虑相应风速的风能输入。

综上所述，对于用天气图计算风场作基本资料推求风浪场的计算模型，在受辐射沙洲影响较小的深水区域是基本可行的，但在水下地形复杂的浅水区域直接风浪场计算工程前沿设计波浪要素将会带来较大误差，而采用波浪折射绕射浅水变形联合计算模式计算结果与实测值比较吻合。经分析认为：天气图风场直接计算模式可作为确定外海深水波要素的方法之一，而工程前沿设计波要素的计算须采用波浪折射绕射浅水变形联合计算模式进行计算。同时，以底摩阻系数取 0.01、与相对风速（设计风速减去波速）的风能输入相组合为计算条件。

4.3 工程设计波要素的计算

(1) 计算区域确定原则

由上述分析确定的计算方法和有关参数，即可进行工程前沿的设计波浪要素计算。对于苏北辐射沙洲的中心区域，距离受地形影响较小的深水边界有百余公里，而欲计算工程前沿设计波浪要素，必须从该深水边界起算，因此计算范围将达到近万平方公里。为了充分反应工程附近水域的局部地形变化，又要适当节省计算工作量，所以在进行地形概化和数值差分计算中分为两个区域大小网格嵌套方法。大网格尺寸为 $0.1' \times 0.1'$ ，而小区域网格尺寸为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 。其计算区域为拟建工程附近新测的（比例尺为 1:10000）水下地形范围，总面积大约为 $7.0\text{km} \times 15.0\text{km}$ 。具体计算时，首先计算各种工况条件下的大区域波浪场，这样，一方面可以了解整个辐射沙洲的波浪变化规律，同时给提供小区域边界条件（包括波高、波向）。

(2) 工程前沿设计波浪要素计算

按上述确定的计算处理原则,分别就不同工况进行波浪传播变形计算。计算中对于各个波浪方向采取各自主方向的左右 22.5° 范围内每隔 7.5° 多方位入射计算,以寻找最不利波浪入射方向,波高采用平均波高,底摩阻系数取为 0.01,风能输入时相关系数按“海大”方法确定(即 $a_H=0.00348$, $b_H=0.35$),如果出现波浪破碎,则按破波波高计算。

通过计算表明,波浪自深水进入浅水的过程中由于受到辐射沙洲复杂水下地形的影响,发生了明显的折射绕射变形,部分区域的波向与原入射波向差别很大,所以进一步说明在该地区不考虑波浪的折绕射影响是不合适的,波向在传播过程中的变化顺应水下地形的变化趋势,波高在空间上的分布变化较大,总的来说波动能量向浅水区域集中,由于沿程风能的继续输入,浅水水域的波高也有所增加,但当潮位较低时,浅水区的波高受到水深的限制。

5. 结语

(1) 对于苏北辐射沙洲滩槽相间、水下地形变化较为剧烈的水域,既受当地局部风浪的影响,又受外海传入涌浪影响,风、浪之关系复杂。

(2) 该地区缺乏长期的波浪观测资料,欲获得工程设计波浪要素,需首先确定深水波要素。方法有二:其一用岸台气象站的风速按陆上一海岸、海岸—海上等相关风速订正后频率分析,确定了各个风向的不同重现期的设计风速,间接推求深水波要素;其二可用地面天气图资料推求海面风场后,进而计算出该海域的波浪场并推求各种重现期的起始边界波浪要素。最后经综合分析确定多年一遇的起始边界波要素。

(3) 对于苏北辐射沙洲滩槽相间、水下地形变化较为剧烈的水域,必须选择科学合理的波浪折射绕射传播变形联合计算模式,经过比较分析表明,缓变水流水深中波浪绕射折射数学模型在该地区较为合适,计算结果合理可信。

6. 参考文献

- [1]交通部,《海港水文规范》(JTJ-98-213), 1998.
- [2] 国家计算监督局、中华人民共和国建设部,《堤防工程设计规范》(GB50286-98), 1998.10
- [3] 华东水利学院海岸工程研究资料第 17 期,洪广文,“风浪要素计算方法汇编”, 1977.
- [4] 江苏省气象研究所,“如东气象站实测风速统计”, 2003.4
- [5] 青岛海洋大学,“海浪数值预报研究技术报告”, 1990.
- [6] The WAMDI Group, “The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model”, *Journal of Physical Oceanography*, 1988.12
- [7] Hong Guangwen, *Mathematical Models for Combined Refraction-Diffraction of Waves on Non-Uniform Current and Depth*, *China Ocean Engineering* Vol.10, No.4, pp433-454.
- [8] 冯卫兵、洪广文,“水流中波浪绕射折射数值计算与分析”, *海洋工程*, 2000 (4)